UNIVERSITÉ DE GENÈVE
DÉPARTEMENT DE GÉOLOGIE ET PALÉONTOLOGIE

FACULTÉ DES SCIENCES
PROFESSEUR A. LOMBARD

DÉFINITION DE MICROFACIÈS PAR CLASSIFICATION AUTOMATIQUE ET COMPARAISON DES DESCRIPTEURS

extrait de

« Application de méthodes statistiques à l'étude d'une formation calcaire du Berriasien supérieur, Jura méridional »

THÈSE

PRÉSENTÉE A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE GENÈVE
POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES
GÉOLOGIQUES ET MINÉRALOGIQUES

PAR

Jean-Michel JAQUET
de Genève

THÈSE N° 1561

GENÈVE
IMPRIMERIE A. KUNDIG
1973

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41545917_0062

UNIVERSITÉ DE GENÈVE
DÉPARTEMENT DE GÉOLOGIE ET PALÉONTOLOGIE

FACULTÉ DES SCIENCES
PROFESSEUR A. LOMBARD

DÉFINITION DE MICROFACIÈS PAR CLASSIFICATION AUTOMATIQUE ET COMPARAISON DES DESCRIPTEURS

extrait de

« Application de méthodes statistiques à l'étude d'une formation calcaire du Berriasien supérieur, Jura méridional »

THÈSE

PRÉSENTÉE A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE GENÈVE
POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES
GÉOLOGIQUES ET MINÉRALOGIQUES

PAR

Jean-Michel JAQUET
de Genève

THÈSE N° 1561

GENÈVE
IMPRIMERIE A. KUNDIG
1973

La faculté des sciences, sur le préavis du professeur A. Lombard, directeur de thèse, et de M. P. Vuagnat, chargé de cours, autorise l'impression de la présente thèse, sans exprimer d'opinion sur les propositions qui y sont énoncées.

Genève, le 23 juin 1972.

Le doyen :
Marc VUAGNAT

Thèse n° 1561

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Extrait des *Archives des Sciences*
Volume 26, fascicule 2, 1973

DÉFINITION DE MICROFACIÈS PAR CLASSIFICATION AUTOMATIQUE ET COMPARAISON DES DESCRIPTEURS

PAR

Jean-Michel JAQUET

Université de Genève, Département de géologie

TABLE DES MATIÈRES

Résumé - abstract 138

Avant-propos 138

1. Introduction 139

2. Expression des données: les descripteurs 140
   2.1. Choix et type des descripteurs 140
   2.2. Echelle de mesure et codage des descripteurs 142

3. Classification automatique des échantillons 144
   3.1. Introduction théorique 144
      3.1.1. Coefficients de similitude 145
      3.1.2. Pondération et corrélation des descripteurs 145
      3.1.3. Mise en évidence des groupes (microfaciès) 146
      3.1.4. Le dendrogramme et sa signification 146
      3.1.5. Procédure et programmation 147
   3.2. Microfaciès obtenus 148
      3.2.1. Classification avec quartz 150
      3.2.2. Classification sans quartz 152
   3.3. Conclusions 153

4. Intérêt comparé des descripteurs 153
   4.1. Introduction 153
   4.2. Variabilité totale 154
      4.2.1. Définition et calcul 154
      4.2.2. Résultats 156
   4.3. Variabilité intra-groupes et pouvoir classificatoire 157
      4.3.1. Définition et calcul 157
      4.3.2. Présence de sous-faciès 159
      4.3.3. Résultats 160
   4.4. Expression de l'intérêt des descripteurs 160
      4.4.1. Combinaison de *Vt* et *Vw* 160
      4.4.2. Résultats 161

5. Relation entre les descripteurs 162
5.1. Introduction 162
5.2. Détermination de l'association 163
5.3. Matrice des interactions et taux d'association 164
5.4. Résultats obtenus 166
5.4.1. Descripteurs non paléontologiques 166
5.4.2. Descripteurs paléontologiques 167

6. Conclusions générales 169

RÉSUMÉ

Plus de 700 échantillons pétrographiques provenant de la formation de Vions (Berriasien sup., Jura méridional) sont classés en 7 microfaciès par une méthode automatique. Les échantillons sont décrits par 41 caractères non numériques, qui servent à l'établissement de coefficients de coïncidence du type Sokal-Michener, calculés entre tous les échantillons pris deux à deux. La matrice des coefficients est traitée par la méthode paire-groupe non pondérée, qui produit un *dendrogramme* sur lequel sont définis les microfaciès.

On exprime ensuite la discriminance des descripteurs par la combinaison des paramètres de *variabilité totale* et de *variabilité intra-groupe*: on arrive ainsi à mettre en évidence quels sont les descripteurs qui jouent un rôle préférentiel dans la classification.

Enfin, l'étude des relations entre les descripteurs, établies sans passer par les coefficients de contingence habituels, permet la mise en évidence de trois associations paléontologiques caractéristiques de la formation étudiée.

ABSTRACT

More than 700 petrographic samples from the Vions formation (Upper Berriasian, Southern Jura mountains, France) are automatically classified into 7 microfacies. These samples are described by means of 41 non-numerical variables (descriptors), which are used to compute matching coefficients (Sokal-Michener type). The coefficient matrix is treated according to the unweighted pair-group method, and a *dendrogram* is produced, on which the microfacies are defined.

The relative importance of descriptors to the classification is then expressed by the combination of the *total* and *within-group variabilities*.

Finally, the degree of relationship between all the descriptors is established without using the usual contingency coefficients, and 3 paleontological associations are shown, which are characteristic of the Vions formation.

AVANT-PROPOS

Ce travail présente une partie des recherches faisant l'objet d'une thèse de doctorat entreprise au Département de géologie de l'Université de Genève, sous la direction du professeur A. Lombard. Je tiens à lui exprimer, à cette occasion, toute ma gratitude pour l'aide qu'il m'a apportée durant ce travail. Mes remerciements vont également au professeur P. Vuagnat, du Département de statistique de l'Université de Genève, qui a bien voulu corriger la partie statistique de ma thèse. J'ai eu la possibilité d'utiliser librement les installations de calcul électronique du Centre cantonal d'informatique de l'Etat de Genève, et je tiens à remercier vivement son directeur, le professeur P. Levrat. Les personnes suivantes m'ont apporté une aide

précieuse dans les diverses étapes de ce travail: MM. R. Olivier, R. Wernli, R. Froidevaux, E. Davaud, N. Steinhauser, J.-P. Vernet, G. Stalder, V. Cornut et P. Zbinden, tous du Département de géologie de l'Université de Genève. Enfin, toute ma gratitude est acquise à mon épouse et mes parents pour le soutien qu'ils m'ont apporté au cours de mes années d'étude.

Le manuscrit complet de la thèse dont sont extraites les lignes qui suivent est déposé au Département de géologie de l'Université, 13, rue des Maraîchers, Genève. Les programmes cités sont à disposition à la même adresse.

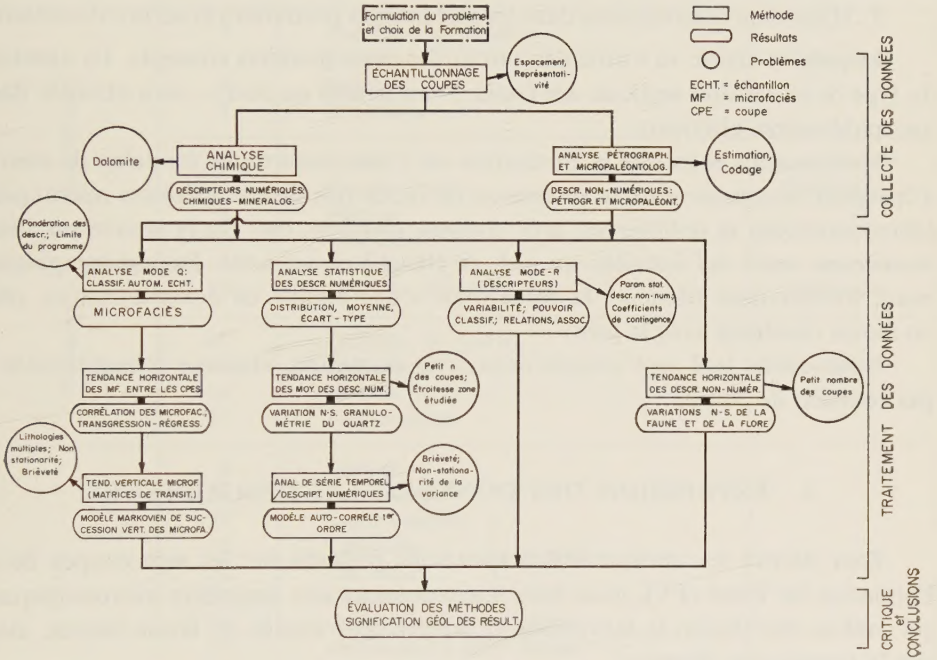


FIG. 1. — Organigramme des méthodes et résultats

1. INTRODUCTION

Les méthodes de classification automatique des échantillons, de comparaison et d'évaluation des variables définissant lesdits échantillons représentent trois étapes d'une recherche plus générale que nous avons conduite sur la Formation de Vions (Berriasien sup. du Jura méridional). L'organigramme de la figure 1 expose les méthodes, résultats et problèmes inhérents à une telle étude générale, dont le but était double: d'une part, il s'agissait d'appliquer et de tester un certain nombre de techniques statistiques et informatiques à l'occasion de l'étude d'une série sédi-

mentaire, bien connue et définie à la suite du remarquable travail de STEINHAUSER (1969). D'autre part, nous désirions aborder l'étude de cette formation sous l'angle de quelques concepts nouveaux qui sont:

1. Classification (structuration) aussi objective que possible des « objets pétrographiques » (roches en lames minces) sur la base de nombreux caractères ou variables chimiques, pétrographiques et paléontologiques.

2. Quantité et qualité d'information apportées par ces caractères ou descripteurs à la suite de leur étude critique.

3. Hasard ou déterminisme dans les mécanismes produisant la série sédimentaire.

Le présent article va s'articuler autour des deux premiers concepts. La question du type de succession verticale des faciès — au hasard ou non — sera abordée dans une publication ultérieure.

Mentionnons enfin que la Formation de Vions mesure une trentaine de mètres d'épaisseur et consiste en une succession de faciès très divers: calcaires micritiques, échinodermiques et oolithiques, grès, marnes, charbon, etc. On la trouve sur l'aire jurassienne entre les Echelles, au sud, et Neuchâtel, au nord. Paléogéographiquement, STEINHAUSER (ibidem) la place dans « une lagune en communication plus ou moins constante avec la mer ».

Nous avons levé sept coupes dans cette formation, chacune échantillonnée à pas constant de 30 cm.

2. EXPRESSION DES DONNÉES: LES DESCRIPTEURS

Pour décrire les quelque 800 échantillons prélevés sur les sept coupes de la Formation de Vions (FV), nous nous sommes limité aux caractères microscopiques, qui sont le *microfaciès*, la *microfaune* et la *microflore* étudiés en lames minces, ainsi que la *composition chimique*.

Nous supposons, avec BONHAM-CARTER (1967 *a*), que le microlithofaciès donne une bonne image du milieu de déposition, image encore confirmée par le microbiofaciès, très riche et varié dans la FV. Quant à la géochimie sommaire, elle fournit tout une série de paramètres qui se prêtent fort bien aux études statistiques.

Ainsi donc, on a mesuré ou évalué sur les échantillons récoltés un grand nombre de caractères (appelés désormais *descripteurs*), dont l'ensemble doit définir le milieu de sédimentation.

2.1. CHOIX ET TYPE DES DESCRIPTEURS

Après examen au microscope d'une centaine d'échantillons, nous avons dressé une liste pratiquement exhaustive des descripteurs, telle qu'elle est reportée dans la table 1.

TABLE 1

Liste des descripteurs et échelle de mesure

Type		N°	Nom du descripteur	Echelle utilisée
Chimiques / Minéralog.		38	Pourcentage de carbonate	NUMÉRIQUE
		1	Pourcentage de quartz	
		40	Pourcentage d'argiles + divers	
		39	Dolomite	ORDINALE
Pétrographiques		2	Oolithes superficielles	ORDINALE
		3	Oolithes	
		4	Pellets	
		5	Intraclasts	
		6	Sparite	BINAIRE
		7	Pseudo-sparite	
		8	Micrite	
		11	« Birdseyes »	
Physiques		35	Granulo. des allochems	ORDINALE
		41	Granulo. du quartz	BINAIRE
		36	Classement	
		34	Bimodalité	
		37	Homogénéité	
Paléontologiques		9	Coraux	BINAIRE
		10	Bryozoaires	
		12	Dasycladacées (Algues)	
		13	Codiacées (Algues)	
		14	Oncolithes (Algues)	
		15	Characées (Algues)	
		16	Ostracodes à paroi mince	
		17	Ostracodes à paroi épaisse	
		18	Milioles	
		19	Trocholines	
		20	Nautiloculines	
		21	Lenticulines	
		22	Pseudotextularielles	
		23	Pseudocyclammines et gros agglutinants	
		26	Textulaires	
		33	Keramosphaera sp.	
		24	Foraminifères divers (TVT)	
		27	Lamellibranches	
		28	Gastéropodes	
		29	Echinodermes	
		25	Aeolysaccus	
		31	Organisme θ	
		32	Vermicules (Thurammines?)	
		30	Charbon	

En ce qui concerne les microfossiles et débris de macrofossiles, leur détermination s'est le plus souvent arrêtée au niveau du genre, voire de la famille.

Dans l'établissement de cette liste, l'on s'est efforcé d'être complet, mais aussi d'avoir des descripteurs définis le plus univoquement possible. En outre, ils devaient répondre aux conditions suivantes (SOKAL et SNEATH 1963, p. 66):

1. Pas de descripteur sans signification. Ainsi serait le descripteur « Fusulines » dans la FV.

2. Pas de caractères logiquement corrélés, tels que dolomite et magnésium.

3. Pas de caractère invariant, tel que « présence de $CaCO_3$ ».

4. Caractères empiriquement corrélés: ce problème est très complexe et l'unanimité quant à leur éviction d'un système taxonomique est loin d'être faite parmi les auteurs. Par « empiriquement corrélé », on entend un caractère dont la présence ou l'absence coïncide presque toujours avec la présence ou l'absence d'un autre. Dans la FV, Trocholines et Milioles sont empiriquement corrélées.

Les trois premières conditions sont satisfaites par les descripteurs choisis. Le problème de la quatrième sera repris plus loin (3.1.2 et 5.4).

Les descripteurs se répartissent dans les catégories suivantes: chimique-minéralogique, physique, pétrographique et paléontologique, suivant la table 1.

2.2. Echelles de mesure et codage des descripteurs

On sait qu'un caractère peut être mesuré ou évalué selon diverses échelles, rappelées ici par ordre de perfectionnement croissant:

— Nominale: par exemple la couleur.
— Binaire ou dichotomique: présence ou absence d'un fossile.
— Ordinale: dimension d'un claste codée en gros-moyen-petit.
— Numérique: pourcentage de carbonate, etc.

Les propriétés de ces échelles, ainsi que les opérations statistiques qui leur sont applicables sont mentionnées dans SIEGEL (1956). Il n'est en effet pas possible de soumettre des données non numériques à des tests paramétriques. D'autre part, on peut toujours transformer des données numériques en données dichotomiques, avec une perte d'information bien sûr, alors que l'opération inverse n'est admissible qu'en des cas exceptionnels.

Comme on peut le voir dans la table 2, les descripteurs utilisés dans cette étude sont mesurés selon les échelles binaire, ordinale et numérique. Pour la classification automatique des échantillons, il a fallu adopter une échelle commune, et les descripteurs ont tous été transformés en binaires.

TABLE 2

Classement des descripteurs

	Catégorie			
Type d'échelle	Chimique-minéralogique	Pétrographique	Paléontologique	Physique
Numérique (quantitative)	Carbonates Quartz Argiles	—	—	(Granulo.quartz)
Ordinale (semi-quant.)	Carbonates Quartz	« Allochems ss »	—	Granulométrie « allochems »
Binaire (qualitative)	—	Matrice Ciment	Microfaune Microflore Bioclastes	Classement « allochems » Homogénéité

Codage des descripteurs

Descripteur	Echelle	
	de mesure	convertie
BINAIRES	Présent	2
	Absent	1
	Incertain	0
ORDINAUX	Abondant	2 2
	Présent	2 1
	Absent	1 1
	Incertain	0 0
NUMÉRIQUES	Par exemple:	
	86–100%	2 2
	51– 85%	2 1
	1– 50%	1 1

Il est clair que du point de vue de la quantité d'information, les descripteurs numériques sont les plus intéressants. Toutefois, leur mesure est en général très longue, et nous avons préféré travailler sur un grand nombre d'échantillons et de descripteurs avec une précision moindre. La quantité d'informations manquées par l'emploi d'échelles inférieures est certainement compensée par l'abondance des descripteurs.

En ce qui concerne le codage, l'emploi du binaire comme échelle commune à tous les descripteurs nous a fait choisir le système préconisé par Bonham-Carter (1967 *b*, p. 2); son principe est expliqué dans la table 2.

Mentionnons enfin que les descripteurs ont été estimés soit sur la base de standards, soit encore par comptages. On se reportera au travail original (Jaquet 1972) pour le détail de la procédure de mesure, ainsi que pour la liste explicative des descripteurs.

3. CLASSIFICATION AUTOMATIQUE DES ÉCHANTILLONS

3.1. Introduction théorique

Les méthodes de classification automatique, telles que l'analyse de grappes (« cluster analysis ») et la typologie (Bergonier et Morin 1972) ont pour but de dégager une *structure* d'une masse de données. Ces dernières peuvent être des objets ou des variables.

Il existe plusieurs façons de mettre en évidence ces structures, et les méthodes font appel à des principes très différents; on en trouvera la liste dans l'ouvrage classique de Sokal et Sneath (ibidem, p. 175). Disons brièvement qu'elles se basent toutes sur une matrice initiale de coefficients de similitude calculée sur les données à classer, et qu'elles reviennent à exprimer de façon simplifiée et graphique ladite matrice. Dans l'analyse en mode Q, c'est-à-dire entre objets, on voit que ces derniers sont décrits par un grand nombre de caractères ou variables sur l'ensemble desquels la classification sera basée; cette dernière est donc multivariée. L'analyse en mode R est l'inverse: à partir de nombreux objets, on cherche à classer les variables.

On peut distinguer deux grands groupes de systèmes classificatoires, l'un hiérarchique, l'autre pas. L'analyse de grappes fait partie du premier, l'analyse typologique du second. Les mérites respectifs des deux systèmes ne seront pas discutés ici. Disons seulement qu'au moment où nous avons commencé ce travail, le meilleur programme d'ordinateur a disposition pour le traitement de données non numériques était celui de Bonham-Carter (1967 *b*), qui propose un système hiérarchique et l'applique à une classification des calcaires (Bonham-Carter 1967 *a*). Depuis lors, les programmes publiés par Parks (1970), Wishart (1969), Demirmen (1969), McCammon et Wenninger (1970) et Bergonier et Morin (1972) ont considérablement diversifié les approches de la classification en Sciences de la Terre. Nous avons donc adopté la méthode hiérarchique un peu par nécessité, mais aussi parce qu'elle permet l'établissement de sous-groupes compris dans des subdivisions plus générales, ce qui est une procédure courante dans toutes les classifications géologiques.

3.1.1. *Coefficients de similitude*

Il existe un très grand nombre de coefficients exprimant la similitude entre deux objets ou variables. On en trouvera des listes dans SOKAL et SNEATH (ibid., p. 125), WISHART (ibid., p. 6) et BOYCE (1969, p. 161).

Après avoir hésité entre 2 coefficients de coïncidence, celui de Sokal-Michener et celui de Jaccard, nous nous sommes décidé pour le premier d'entre eux, suivant l'avis de SOKAL et SNEATH (ibid., p. 128). Soit par exemple deux objets décrits par cinq variables codées présent-absent.

	1	2	3	4	5	variable
Objet A	2	2	1	1	0	
Objet B	1	2	2	1	2	
	NC	*CP*	*NC*	*CN*	*CD*	$T = 4$

2: présent
1: absent
0: douteux

On a: NC = non-coïncidence; CP = coïncidence positive; CN = coïncidence négative; CD = cas douteux (non considéré); $T = N$ de comparaisons moins les CD; $f(\ )$ = fréquence des divers cas.

Le coefficient de Sokal-Michener S_{SM} est donné par

$$S_{SM} = \frac{f(CP) + f(CN)}{f(CP) + f(CN) + f(NC)} \qquad (0 \leqslant S_{SM} \leqslant 1) \qquad (1)$$

et il varie entre 0 pour une dissimilitude complète et 1 pour une similitude totale.

3.1.2. *Pondération et corrélation des descripteurs*

L'un des importants problèmes à résoudre lors de l'emploi des méthodes de taxonomie numérique est celui de la pondération des caractères. D'après CORNUAU et FREYSSENET (1968, p. 15), une variable codée en vingt classes sera deux fois plus « discriminante » qu'une variable codée en dix. Par discriminant, on entend l'aptitude de la variable à influencer la classification. Ainsi, le mode de mesure et le codage peuvent donner à une variable une importance exagérée.

La plupart des auteurs sont d'accord pour considérer une pondération égale des caractères *a priori* comme étant la meilleure stratégie. Il serait donc souhaitable, dans un premier temps, de donner à tous les caractères une pondération égale. Dans le cas de données non numériques, il s'agirait de choisir d'emblée un code semblable pour toutes les variables. Nous avons quant à nous, par hypothèse, pondéré certains

descripteurs dans le but d'établir une classification naturelle certes, mais dont les groupes puissent être rapprochés de ceux des systèmes classiques, comme celui de FOLK (1962). Ces derniers sont essentiellement basés sur des critères pétrographiques. On a donc donné légèrement plus d'importance aux descripteurs chimiques et pétrographiques (3 états contre 2 pour le reste des descripteurs, d'où une pondération de 1,5). On verra plus loin que cette pondération est modérée et tout à fait acceptable.

La corrélation entre les descripteurs a déjà été mentionnée sous 2.1. Si trois caractères dépendent d'un quatrième, il est clair que ce dernier sera pondéré quatre fois si l'on garde les quatre caractères pour la classification. Ces groupes de caractères positivement corrélés « imposeront leur loi » aux variables isolées et influenceront fortement la formation des groupes (CORNUAU et FREYSSENET, ibid., p. 16), ce qui est considéré comme normal par ces derniers auteurs.

Il est donc difficile de prendre une décision en ce qui concerne l'élimination de certains descripteurs. Dans la présente étude, la liaison entre les descripteurs n'est jamais très forte (planche II); c'est pourquoi nous n'avons pas jugé utile d'éliminer certains d'entre eux, et l'analyse a été faite sur la base des 41 descripteurs originaux.

3.1.3. *Mise en évidence des groupes (microfaciès)*

De même qu'il existe plusieurs coefficients de similitude, on a le choix entre de nombreuses méthodes de mise en évidence des groupes (« clustering »). Ces méthodes sont présentées en détail par SOKAL et SNEATH (ibid. p. 178 sq.), et évaluées par BOYCE (ibid.). Nous inspirant de ce dernier auteur, nous avons choisi la méthode *paire-groupe non pondérée*, utilisant la moyenne arithmétique des coefficients de similitude entre les individus de deux groupes comme mesure de la similitude entre ces derniers (« unweighted pair-group method using averages » ou UPGMA, ou encore en français, MPGNP).

3.1.4. *Le dendrogramme et sa signification*

L'expression graphique des groupes mis en évidence par les méthodes précitées s'appelle un *dendrogramme* (SOKAL et SNEATH, ibid., p. 198). Il s'agit d'une sorte d'arbre généalogique à tronc horizontal, sur l'axe duquel est reporté le degré de similitude des différents branchements. L'autre axe (vertical) montre les numéros des objets classés (planche I).

La définition des groupes sur le dendrogramme se fait « à l'œil », mais de façon relativement univoque si les groupes sont bien définis à un haut niveau de similitude. Par contre, en dessous d'un certain niveau, proche d'une valeur calculée limite (« mean expected value of association », BONHAM-CARTER 1967 *b*), les groupes n'ont plus de signification; ce sont ceux que l'on pourrait observer sur des données artificielles dont les descripteurs sont codés de façon aléatoire. Ce coefficient MEV permet donc, dans une certaine mesure, de tester si les groupements sont réels ou au hasard.

3.1.5. *Procédure et programmation*

L'établissement de la classification s'est fait selon le diagramme de la figure 2 à l'aide des programmes Fortran suivants:

— SELECS: des 746 échantillons récoltés dans les sept coupes, on tire une série de 178 à l'aide d'un plan d'échantillonnage stratifié au hasard (KRUMBEIN et GRAYBILL 1965, p. 156). Cette opération est répétée cinq fois, ce qui produit cinq séries de 178 échantillons qui ont été traitées par les programmes suivants.

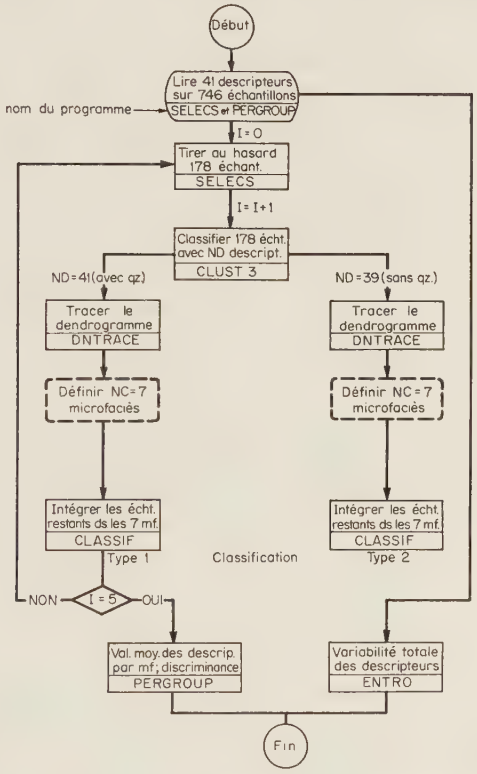


FIG. 2. — Procédure de classification et programmes utilisés

— CLUST3 (BONHAM-CARTER 1967 *b*, modifié): ce programme calcule la matrice des coefficients de coïncidence S_{SM} pour un nombre limite de 178 échantillons, fixé par la capacité de l'ordinateur. Ces 178 objets sont ensuite subdivisés en *NC* groupes par la méthode MPGNP (voir 3.1.3.), et une estimation du coefficient *MEV* est calculée.

— DNTRACE (BONHAM-CARTER 1967 *b*, modifié): cette routine adaptée au plotter Benson dessine les dendrogrammes produits par CLUST3 (planche 1).

— CLASSIF: ce programme place dans les *NC* microfaciès définis sur la base des résultats de CLUST3 les 586 échantillons restants. L'attribution à un microfaciès se fait en calculant pour chacun d'entre eux la moyenne des coefficients de coïncidence de ses membres avec l'échantillon à classer. Ce dernier est placé dans le groupe pour lequel le coefficient moyen est le plus élevé.

— PERGROUP: une fois les microfaciès établis, il est nécessaire de les définir par la valeur « moyenne » que prennent les descripteurs pour chacun d'entre eux. Ce programme calcule les fréquences relatives des différents états (codés 22, 21, 11, 2 et 1) pour chaque descripteur et chaque microfaciès. Les valeurs sont reportées sur un diagramme tel que celui de la figure 4, en utilisant la convention indiquée au bas de cette figure; on obtient ainsi un « profil » des descripteurs pour un microfaciès donné (CORNUAU et FREYSSENET, ibid., p. 24). Mentionnons que les descripteurs à trois états ont été transformés en binaires par groupement des fréquences 22 et 21. Ce programme calcule enfin une mesure du pouvoir classificatoire basée sur la notion d'entropie, dont on parlera sous 4.3.

— ENTRO: ce programme calcule la variabilité totale des descripteurs (voir 4.2); ses résultats sont combinés avec ceux de PERGROUP pour l'établissement d'une mesure de la « qualité » des descripteurs (voir 4.4).

Pour permettre une comparaison des classifications, nous avons effectué cinq tirages au hasard de 178 échantillons, passant donc cinq fois dans la boucle de gauche de la figure 2. Faute d'une technique rigoureuse pour la comparaison des dendrogrammes obtenus, nous nous sommes borné à les comparer visuellement. Dans les cinq cas, les mêmes groupes principaux sont apparus, quoique avec des effectifs un peu différents. On peut donc admettre que les classifications établies sur des séries diverses d'échantillons représentatifs des sept coupes sont pratiquement les mêmes.

3.2. MICROFACIÈS OBTENUS

La Formation de Vions est caractéristique d'une plateforme carbonatée soumise à plusieurs arrivées de détritiques terrigènes; les roches qui la constituent témoignent donc d'un milieu local dont l'équilibre a été troublé à plusieurs reprises par des venues extérieures qui se sont superposées à la sédimentation autochtone. Nous avons tenté de séparer ces deux composants en établissant deux classifications, la première tenant compte du quartz, la seconde pas. La planche I montre le dendrogramme de la classification avec quartz.

Chaque microfaciès est défini par son « profil » (fig. 3 pour la classification avec quartz), qui montre la valeur « moyenne » des descripteurs pour chaque microfaciès. Vu le grand nombre de descripteurs, on s'est borné à définir les microfaciès à l'aide d'un nombre limité de descripteurs-clés. Quant aux noms donnés à ces microfaciès, ils essaient de les décrire en quelques mots en s'inspirant de la termino-

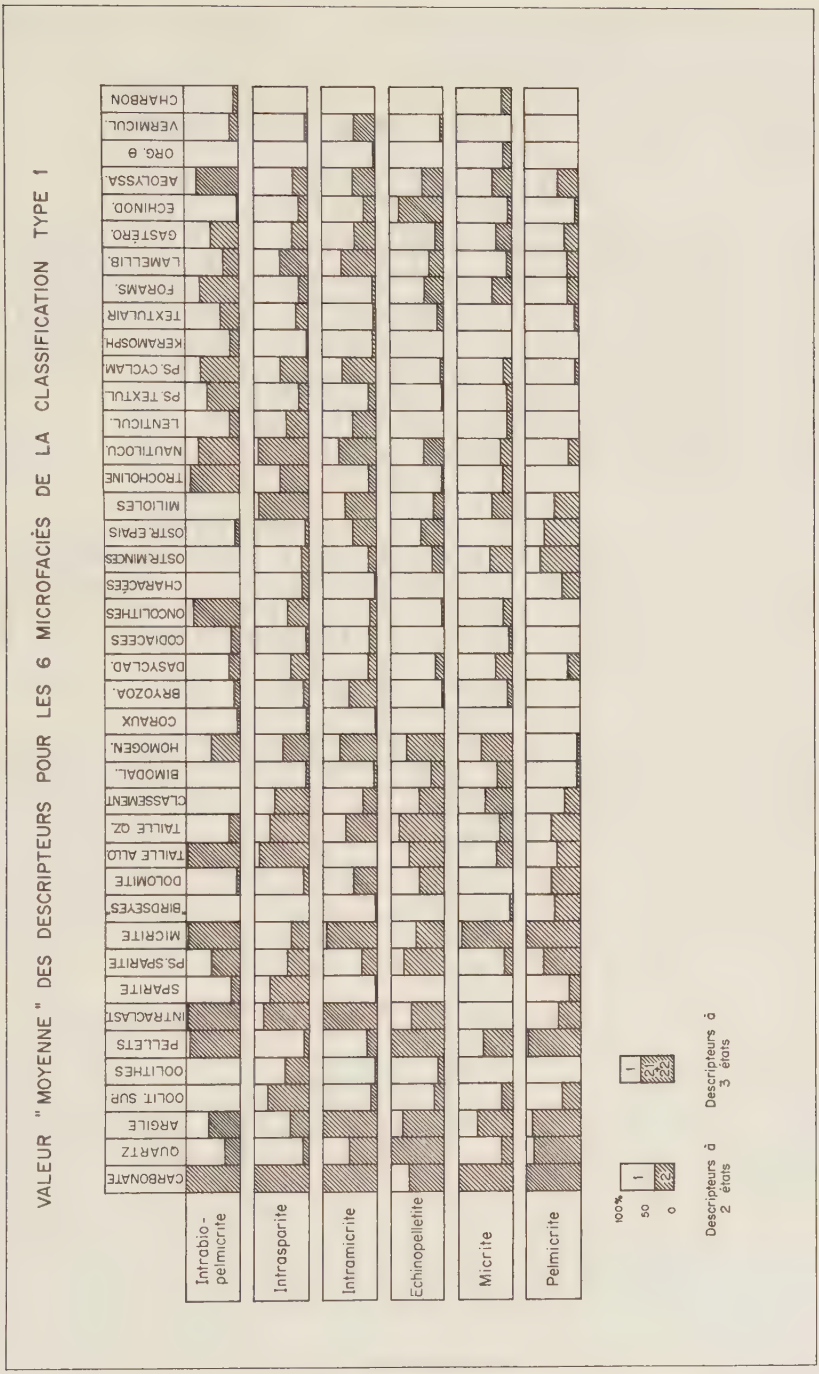


FIG. 3. — Profil de microfaciès pour la classification type 1

logie de Folk (ibid.). Il est important de noter, toutefois, que les termes utilisés ne font qu'approximer grossièrement des microfaciès définis sur la base de multiples caractères; le fait d'employer un mot tel que pellet n'implique pas que le groupe ainsi qualifié soit basé préférentiellement sur ce dernier descripteur.

3.2.1. *Classification avec quartz*

Les microfaciès retenus se définissent tous à un niveau de similitude compris entre 0,70 et 0,75 (voir dendrogramme, planche I); ils sont au nombre de sept. Les relations entre les microfaciès sont assez difficiles à lire sur le dendrogramme à cause de la mauvaise définition des branchements inférieurs; on peut voir toutefois que les groupes intrabiopelmicrite à riche faune et intrasparite plus ou moins oolithique sont génétiquement liés, de même que pelmicrite et micrite.

Voici la description sommaire des sept microfaciès, ainsi que leur interprétation (fig. 3):

— *Intrabiopelmicrite à algues et à forams :* ce faciès est hautement carbonaté, les détritiques y sont rares et la dolomite quasiment absente. Pétrographiquement, il consiste en un mélange grossier et mal classé d'intraclastes et de pellets. La microfaune et la microflore sont riches: oncolithes, milioles, trocholines, nautiloculines, pseudotextularielles et pseudocyclammines sont abondantes; on y trouve aussi Keramosphaera, des textulaires et divers forams (TVT), ainsi que des gastéropodes et Aeolysaccus. Les coraux et le charbon sont rares.

On peut interpréter ce microfaciès comme le plus marin de notre gamme. La salinité est normale et le milieu calme (peu de sparite).

— *Intrasparite plus ou moins oolithique :* la teneur en carbonate est haute et les terrigènes (quartz grossier) très rares, ainsi que la dolomite. Les allochems consistent en un mélange relativement bien classé d'intraclastes plus ou moins oolithisés et d'oolithes, sans pellets, et cimenté par de la sparite. La faune est souvent difficilement reconnaissable parce que roulée; elle est assez semblable à celle du microfaciès précédent, avec des algues (dasycladacées et oncolithes), milioles, trocholines, nautiloculines, lenticulines et pseudocyclammines; les lamellibranches sont relativement abondants et les textulaires et pseudotextularielles plus rares.

On peut voir dans ce faciès un équivalent de « haute énergie » du précédent, ayant pris naissance dans des zones agitées (barres, etc.). Les oolithes ne sont toutefois pas toutes cantonnées dans ce microfaciès; on les trouve parfois dans une matrice micritique.

— *Intramicrite :* ce grand groupe est assez homogène, et il n'est pas facile d'y définir des sous-faciès. Dans son ensemble, il est bien carbonaté, mais avec la présence notable de terrigènes, surtout argileux. La dolomite y est présente. Les gros intraclastes forment l'essentiel des allochems et les pellets y sont très rares, de même que la sparite, alors que la micrite abonde. Le classement est variable, plutôt mauvais, mais le microfaciès est en général homogène. Quant à la flore, elle est très réduite, et la faune peu abondante se caractérise par les débris de bryozoaires, quelques ostracodes, milioles, nautiloculines, lenticulines, gros agglutinants, lamellibranches et gastéropodes. Les vermicules (Thurammines?) sont assez abondants; ils carient souvent les intraclastes.

La relative rareté de la faune et de la flore, ainsi que leur mauvais état de conservation, la présence de bryozoaires et de vermicules sont caractéristiques de ce microfaciès. Son attribution a un paléo-environnement est assez délicate, car on ignore l'origine des intraclastes. On pourrait l'attribuer à une action mécanique analogue (mais plus modérée) à celle qui forme les oolithes, avec dépôt postérieur dans des micrites plus tranquilles; ou bien à la dislocation de micrite dans la zone intertidale (Bolliger 1968); ou encore à une action organique (bactérienne, fécale?), ce qui pourrait expliquer la concentration de débris de tests dans certains intraclastes. La rareté des fossiles pourrait indiquer un milieu assez *confiné*, loin des apports d'eau renouvelée.

— *Echinopelletite gréseuse ou grès échinodermique :* ce néologisme désigne un microfaciès typique de la FV, mais que l'on retrouve aussi dans le Bathonien du Jura (WERNLI et JAQUET 1972, JAQUET 1966), dans le membre du Guiers (Formation de la Chambotte), et même dans certains niveaux du Calcaire roux valanginien (à Thoiry en particulier). Il s'agit d'un microfaciès moins carbonaté que les précédents, riche en quartz relativement grossier et en argile. Les pellets, quelquefois oolithisés, forment l'essentiel des allochems. Ils sont pris dans une mosaïque de pseudo-sparite dérivant principalement de la recristallisation d'abondants fragments d'échinodermes. Il arrive parfois que ces derniers constituent la presque totalité de la roche. La micrite est rare, la sparite absente et la dolomite presque toujours présente, voire abondante. Des intraclastes dispersés peuvent apparaître, ce qui provoque une bimodalité de taille caractéristique de certains termes. Le classement est très bon et l'homogénéité totale. Macroscopiquement, on note la présence de laminations et d'une légère stratification oblique. La faune est caractérisée par l'abondance des échinodermes (probablement une majorité de crinoïdes) auxquels sont associés ostracodes à test épais, nautiloculines, fragments de mollusques et petits foraminifères à test noir et mince, entrant dans la catégorie des TVT (trochaminidés, verneuillinidés, textularidés *). Les algues, hormis quelques fragments de macroporelles, sont absentes, de même que l'association milioles — trocholines — pseudotextularielles.

Ce microfaciès présente un grand intérêt par sa « bonne définition » (voir son profil très contrasté (fig. 4)) et par son apparition à plusieurs époques du Mésozoïque. L'association d'échinodermes avec des pellets et du détritisme rapprocherait ce microfaciès du Calcaire Roux; en revanche, l'association de forams TVT et de pellets le rend très semblable aux calcaires terreux du Bathonien de la première chaîne jurasienne, près de Genève.

La présence de dolomite dans l'échinopelletite a posé quelques problèmes. Nous l'avions d'abord attribuée à la porosité de ce grès, où elle serait venue par migration à partir de faciès producteurs. Nous devons à J. GUEX (comm. orale) une explication bien meilleure: en effet, la teneur en carbonate de magnésium des tests de crinoïdes peut atteindre 20% (CHILINGAR et al., 1967, p. 43). Cette dolomite n'indique donc pas un faciès confiné.

L'interprétation paléogéographique de ce faciès devrait aller au-delà des lieux communs sur les calcaires spathiques. Un fait ressort clairement, même d'un examen macroscopique: ces sédiments ont été soumis à un certain hydrodynamisme (laminations, stratifications faiblement obliques); le fait qu'ils coïncident avec l'apex des apports terrigènes peut faire penser à une association quartz-crinoïdes, ou au contraire à la destruction de prairies d'encrines par les terrigènes. AGER (1963, p. 132) dénonce l'opinion communément répandue que les encrines aient vécu en milieu purement calcaire; il semble au contraire que les accumulations de débris de crinoïdes soient des thanatocénoses, et que ces organismes aient vécu sur des fonds plus marneux. Il est également possible que les courants chargés de terrigènes aient aussi apporté des éléments favorables à la croissance de ces organismes (sels minéraux, eau à une salinité favorable, etc.). Enfin, il ne faut pas oublier la réceptivité des échinodermes à l'hydrodynamisme du milieu. Leur densité faible permet un transport relativement facile; cela pourrait en particulier expliquer leur coexistence avec des particules de quartz beaucoup plus petites.

A l'instar des intramicrites, le problème du milieu de formation de ce microfaciès sera repris plus loin.

— *Micrite :* on trouve dans la FV de vrais calcaires micritiques, sans allochems ni faune, et d'autres où les microfossiles sont relativement abondants. En moyenne, ce microfaciès est très carbonaté, pauvre en quartz, parfois argileux. Les pellets, présents en petites quantités, sont souvent flous (coagulation de la micrite). Sparite et pseudo-sparite sont virtuellement absentes, ainsi que la dolomite. La flore est représentée surtout par des dasycladacées. Les ostracodes minces sont abondants, les milioles présentes, ainsi que les lamellibranches, gastéropodes, Aeolysaccus et organisme théta; il y a également un peu de charbon.

Il est possible que ce microfaciès regroupe des termes provenant d'environnements assez différents; on sait en effet que la micrite peut avoir des origines diverses. En ce qui concerne la plupart des membres de ce microfaciès, la présence d'algues les placeraient dans une zone voisine des intrapelmicrites, mais plus interne.

---

* Communication orale de R. WERNLI.

— *Pelmicrite :* à côté du carbonate abondant, on trouve dans ce microfaciès une notable proportion d'argile et de quartz, quelques oolithes superficielles et de nombreux pellets. La pâte est micritique, parfois pseudosparitique avec des « birdseyes », et la dolomite est présente; la flore comprend une association dasycladacées — characées, et la faune, pauvre, consiste surtout en ostracodes minces, milioles, gastéropodes et Aeolysaccus.

La présence de « birdseyes », de dolomite (ne provenant pas des échinodermes, absents dans ce faciès), d'ostracodes et de characées laisse présager un milieu de formation à tendances confinées. Ce faciès peut passer soit à la micrite, soit à l'échinopelletite.

— *Divers :* il existe sur le dendrogramme un groupe de quelques échantillons qui se rattachent aux microfaciès précédents à un niveau de similitude assez bas. Ils représentent des individus à caractères de passage entre les autres microfaciès. Plutôt que d'en faire un groupe distinct, on a préféré les intégrer, à l'aide du programme CLASSIF (voir sous 3.1.5.), dans les microfaciès avec lesquels ils avaient le plus d'affinités.

3.2.2. *Classification sans quartz*

Sur la base d'un second dendrogramme, non figuré ici, on a défini les sept microfaciès suivants: intraoosparite, intraoomicrite, intrabiopelmicrite, intramicrite, micrite, pelmicrite et échinopelletite. Par rapport à la classification tenant compte du quartz, on peut voir que plusieurs microfaciès sont analogues; plus précisément,

TABLE 3

Correspondance des classifications de type 1 et 2

Type 1 (avec quartz)	Type 2 (sans quartz)
Intrabiopelmicrite	Intrabiopelmicrite
Intramicrite	Intramicrite
Micrite	Micrite
Echinopelletite	Echinopelletite
Pelmicrite	Pelmicrite: contient plus d'oolithes et d'intraclastes; plus grossier; moins classé; faune légèrement différente
Intrasparite ± oolithique	— Intraoosparite: pas de micrite; allochems plus petits; plus homogène; très bien classé. — Intraoomicrite: moins homogène; mal classé; faune et flore légèrement différents.

on a les correspondances présentées dans la table 3. Les quatre premiers microfaciès sont tout à fait semblables, que l'on tienne compte du quartz ou non. La pelmicrite type 2 contient plus d'allochems que celle du type 1. Quant à l'intrasparite du type 1, elle est l'équivalent de deux microfaciès à oolithes, l'un avec sparite, l'autre avec micrite.

On peut en conclure que les différences entre les deux options de classification sont finalement assez faibles. On pouvait s'y attendre pour les microfaciès contenant peu ou pas de quartz (intrabiopelmicrite, intramicrite, micrite, intrasparite); en revanche, les deux faciès riches en quartz réagissent différemment l'un de l'autre: le profil de l'échinopelletite n'est pratiquement pas affecté par la disparition des descripteurs reliés au quartz, alors que celui de la pelmicrite l'est bien d'avantage. On peut l'expliquer par le fait que le quartz est relativement bien *corrélé* avec d'autres descripteurs caractéristiques de l'échinopelletite (échinodermes en particulier), alors qu'il l'est beaucoup moins dans le cas de la pelmicrite.

Ce résultat est intéressant du point de vue de l'interprétation des microfaciès. La non-corrélation du quartz avec d'autres descripteurs dans le cas de la pelmicrite pourrait impliquer une venue accidentelle et peu importante d'un élément étranger (quartz) dans un milieu autochtone (micrite). Dans le cas de l'échinopelletite en revanche, la phase autochtone est pratiquement absente et les échinodermes auraient été amenés par le courant avec le quartz.

3.3. Conclusions

Par rapport aux classifications purement lithologiques, le système adopté dans ce travail nous semble présenter un certain nombre d'avantages: la classification étant basée sur tous les descripteurs pratiquement codables dans la roche, elle est donc multivariée et sûrement moins artificielle que les systèmes habituellement employés. En outre, elle dépend aussi peu que possible de la subjectivité de l'observateur. L'automatisation d'une partie de la procédure permet le traitement assez rapide de nombreux échantillons. Enfin, le système du « profil » caractéristique pour chaque microfaciès permet une comparaison visuelle de ces derniers et surtout encourage à les décrire chacun dans le même ordre, ce qui est un premier pas dans la direction d'une description standard des roches.

4. INTÉRÊT COMPARÉ DES DESCRIPTEURS

4.1. Introduction

Une fois la classification des échantillons établie, on peut se demander quelle est l'*influence* respective des divers descripteurs dans la structuration en groupes ou microfaciès. En général, pour une classification comprenant NC groupes distincts, un descripteur sera intéressant si sa valeur est homogène à l'intérieur des groupes et contrastée d'un groupe à l'autre. En termes de variance, la variance intra-groupes VW (« within group ») doit être petite comparée à la variance inter-groupes VB (« between groups »), ceci ne s'appliquant strictement qu'à des descripteurs numériques, mais étant valable analogiquement pour des descripteurs non numériques.

Cette règle est exprimée d'une façon différente par BERGONIER et al. (1972, p. 2), qui font intervenir la variance totale VT pour une variable donnée de la façon suivante:

$$R_2 = \frac{VB}{VT} \qquad (0 \leqslant R_2 \leqslant 1) \tag{2}$$

où R_2 est la discriminance ou proportion de variance expliquée par le groupement adopté. Cette formule peut s'écrire aussi

$$R_2 = \frac{VB}{VB + VW} \tag{3}$$

Si l'on veut que R_2 soit égal à l'unité, il faut poser que la variance VW est nulle. Si $VW > 0$, R_2 va forcément diminuer. En d'autres termes, quel que soit VB, VW devra être petite par rapport à VB si l'on veut que R_2 soit proche de l'unité.

Revenant maintenant au cas de variables non numériques, on peut démontrer qu'il n'est pas indiqué d'employer la variance pour mesurer la variabilité ou dispersion des valeurs autour d'une « moyenne » dont l'expression pose aussi quelques problèmes. D'après WISHART (ibid., p. 5), la transformation de l'échelle ordinale en échelle numérique est très délicate et le résultat peut dépendre fortement des valeurs utilisées pour remplacer les codes. Nous avons donc essayé d'exprimer la variabilité des descripteurs d'une autre manière; nous y sommes arrivé pour la variabilité totale et la variabilité intra-groupe, mais pas pour la variabilité inter-groupe.

4.2. VARIABILITÉ TOTALE

4.2.1. *Définition et calcul*

Si l'on considère les valeurs prises par un descripteur binaire sur l'ensemble des échantillons à classer, trois cas limites peuvent se produire:

1. — Le descripteur est toujours codé présent.
2. — Il est codé tantôt présent, tantôt absent, et ce dans une proportion de 50 %.
3. — Il est toujours codé absent.

Quelle *information* peuvent apporter les descripteurs suivant ces trois cas, lorsque les objets ont été groupés en microfaciès? Il est évident que dans les cas 1 et 3, le descripteur aura le même code dans tous les microfaciès, ce qui montre qu'il est inutile dans le processus de classification: il ne produit pas de contrastes entre les groupes. Dans le cas 2 au contraire, il existe des chances (mais pas la certitude) que le descripteur ait des codes contrastés d'un microfaciès à l'autre. Intuitivement, on perçoit que la variabilité totale est nulle dans les cas 1 et 3, alors qu'elle ne l'est pas dans le second cas. On peut en conclure que la variabilité totale exprime la *chance de contrastes* entre les microfaciès.

Pour exprimer cette variabilité, nous avons eu recours à la notion d'entropie, telle qu'elle est définie dans l'article classique de PELTO (1954) et dans le traité de MILLER et KAHN (1962, p. 426). Soit un descripteur binaire ($M = 2$ états) ou ordinal ($M = 3$ états) codé sur un certain nombre d'échantillons. A partir des formules de l'entropie

$$H_m = -\sum \frac{1}{M} Ln \frac{1}{M} = LnM \tag{4}$$

(Entropie maximale pour un système à M états)

$$H_r = \frac{-\sum_{i=1}^{M} p_i \, Lnp_i}{H_m} \qquad (0 \leqslant H_r \leqslant 1) \tag{5}$$

(Entropie relative pour un système à M états où p_i = fréquence du ième état en %), on définit la *variabilité totale :*

— pour un descripteur binaire

$$V_t = \frac{-[p_1 (Lnp_1) + p_2 (Lnp_2)]}{0{,}693} \qquad (0 \leqslant V_t \leqslant 1) \tag{6}$$

p_2 = fréquence en % du cas « présent » (codé 2 dans ce travail)
p_1 = fréquence du cas « absent » (codé 1)

— pour un descripteur ordinal

$$V_t = \frac{-[p_{11}(Ln_{11}) + p_{21}(Ln_{21}) + p_{22}(Ln_{22})]}{1{,}099} \qquad (0 \leqslant V_t \leqslant 1) \tag{7}$$

p_{11} = fréq. en % du cas « absent » (codé 11)
p_{21} = fréq. en % du cas « présent » (codé 21)
p_{22} = fréq. en % du cas « abondant » (codé 22)

Variabilité minimale : en reprenant le début de 4.2.1., on voit que le descripteur est invariant dans les cas 1 et 3; il ressort des formules (6) et (7) que V_t est nul, donc que la variabilité est minimale. On définit donc cette dernière comme la valeur que prend V_t lorsque le descripteur, binaire ou ordinal, est soit toujours codé présent, soit toujours codé absent dans les NT échantillons considérés (fig. 4, *a* et *b*).

Variabilité maximale : 1) Pour un descripteur binaire, elle est définie comme la valeur que prend V_t quand le descripteur est codé présent et absent dans une proportion de 50%. Cette valeur est égale à l'unité (voir formules (6) et (7)). 2) Pour un descripteur ordinal à trois états, le problème est plus subtil. On peut en effet avoir les deux cas mentionnés dans la figure 4 *d*. Dans lequel de ces cas la variabilité est-elle maximale? Si l'on prend une analogie numérique, B est plus dispersé que A, bien qu'un histogramme de cette forme soit très rare en pratique (MILLER et KAHN, ibid., p. 432) et tout à fait inexistant dans nos données; en effet, si l'on établit pour

les descripteurs ordinaux utilisés dans cette étude des histogrammes semblables à ceux de la figure 4, on s'aperçoit qu'ils sont soit symétriques autour de la classe 21, soit biaisés à gauche, avec le maximum dans la classe 11. Il est donc légitime de considérer que la variabilité maximale se mesure sur un histogramme de type A (fig. 4*d*), où les échantillons sont également répartis dans les trois classes (33,3 %). V_t vaut alors également 1.

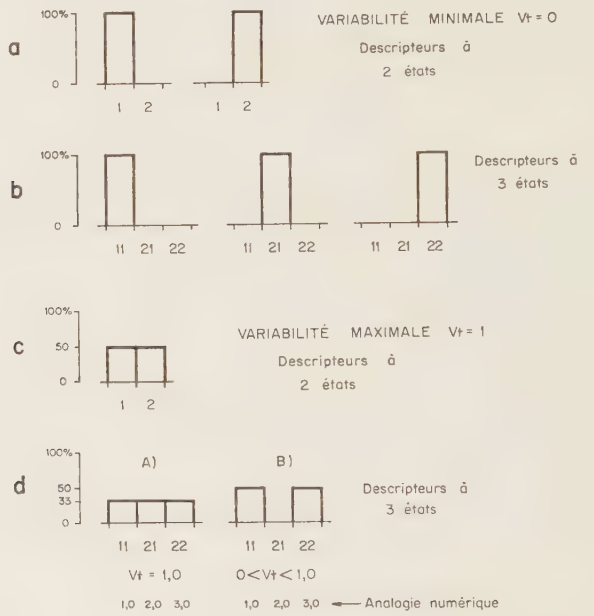


FIG. 4. — Valeurs minimale et maximale de la variabilité totale

L'entropie relative fournit donc une mesure *approximative* mais commode de la variabilité des descripteurs non numériques. Elle varie entre zéro pour une invariance totale et l'unité pour une variabilité maximale.

4.2.2. *Résultats*

La variabilité totale des 41 descripteurs calculée par le programme ENTRO est listée par ordre décroissant dans la table 4. On y voit que les coraux, le charbon, l'organisme théta et Keramosphaera sont quasiment invariants, et que la variabilité de descripteurs *a priori* intéressants, tels que les oolithes, les characées et les codiacées, est faible.

On verra plus loin que la variabilité totale est employée en conjonction avec la variabilité intra-groupe pour établir une mesure de l'intérêt comparé des descripteurs.

TABLE 4

Variabilité totale, variabilité intra-groupe et pouvoir classificatoire des descripteurs

	Vt	*Vw*	*PC*
Nautiloculines	0,9780	0,8168	0,1832
Pseudotextularielles	0,9722	0,4966	0,5034
Pellets	0,9666	0,5989	0,4011
Milioles	0,9653	0,6900	0,3100
Argiles	0,9595	0,7385	0,2615
Granulo. quartz	0,9497	0,8527	0,1473
Aeolysaccus	0,9475	0,9150	0,0850
Intraclastes	0,9291	0,6431	0,3569
Pseudosparite	0,9183	0,8624	0,1376
Quartz	0,9160	0,5782	0,4218
Echinodermes	0,9010	0,5751	0,4249
Granulo. alloch.	0,8959	0,6914	0,3086
Classement alloch.	0,8866	0,7351	0,2649
Homogénéité	0,8865	0,8547	0,1453
Lamellibranches	0,8808	0,8654	0,1346
Gastéropodes	0,8707	0,8813	0,1187
Trocholines	0,8373	0,4770	0,5230
Ostracodes épais	0,8372	0,2827	0,7173
Micrite	0,8136	0,4957	0,5043
Forams. divers	0,8040	0,6126	0,3874
Carbonate	0,7741	0,4593	0,5407
Ostracodes minces	0,7559	0,5577	0,4423
Pseudocyclammines	0,7490	0,7688	0,2312
Vermicules	0,7440	0,5640	0,4360
Oncolithes	0,7313	0,4903	0,5097
Dasycladacées	0,6955	0,6516	0,3484
Lenticulines	0,6849	0,6841	0,3159
Bryozoaires	0,6610	0,5771	0,4229
Sparite	0,6587	0,3639	0,6361
Dolomite	0,6424	0,6216	0,3784
Bimodalité	0,6262	0,3775	0,6225
Oolithes superficielles	0,5999	0,4716	0,5284
Textulaires	0,4302	0,4475	0,5525
Codiacées	0,3974	0,4044	0,5956
Birdseyes	0,2888	0,2190	0,7810
Characées	0,2725	0,3299	0,6701
Oolithes	0,2359	0,2027	0,7973
Keramosphaera	0,1549	0,1809	0,8191
Organisme théta	0,1196	0,0892	0,9108
Charbon	0,0948	0,1312	0,8688
Coraux	0,0639	0,0892	0,9108

4.3. VARIABILITÉ INTRA-GROUPES ET POUVOIR CLASSIFICATOIRE

4.3.1. *Définition et calcul*

Il est plus facile de caractériser un microfaciès en termes d'un descripteur donné, si ce dernier a la même valeur, ou presque, pour tous les membres de ce microfaciès. Pour un descripteur non numérique, il faut qu'on ait dans le microfaciès des fré-

quences d'état (présent, absent) aussi proches que possible de 0 ou de 100%. La figure 5 le démontre graphiquement; il s'agit d'un fragment de profil hypothétique (voir 3.1.5) de trois microfaciès définis par quatre descripteurs, où la fréquence en % du code « présent » est indiquée en grisé. On voit qu'il est impossible de différencier les microfaciès par le descripteur D1, qui est codé présent à 50% dans chacun d'entre eux. Avec D2, la séparation est déjà plus facile. Avec D3, on peut dire qu'il est souvent codé « absent » dans les microfaciès 1 et 3, et « présent » dans le 2, ce qui rend la définition des microfaciès plus univoque. Finalement, D4 a des fréquences d'états égales à 0 et 100%, et il permet une définition parfaite des trois microfaciès.

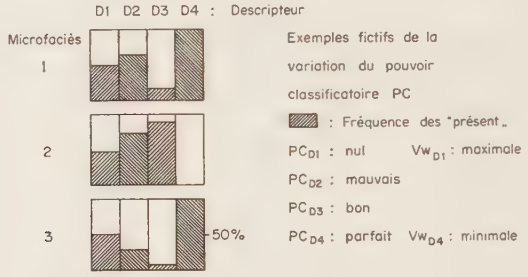


FIG. 5. — Principe de la variabilité intra-groupe et du pouvoir classificatoire

Ainsi donc, lorsque les fréquences d'états sont identiques dans tous les microfaciès, la variabilité du descripteur à l'intérieur des groupes est maximale, selon le raisonnement adopté sous 4.2.1. Quant à la variabilité entre les groupes, elle est nulle: il n'est alors pas possible de différencier les groupes sur la base de ce descripteur.

On peut alors définir la *variabilité intra-groupe* et le *pouvoir classificatoire* en faisant appel à la notion d'entropie introduite plus haut. Soit un descripteur (indicé i) codé sur M états, NC groupes définis sur le dendrogramme, N_j échantillons dans le $j$ème groupe, et NT échantillons au total. Par analogie avec (5), on définit la variabilité du $i$ème descripteur pour le $j$ème groupe comme

$$Vg_{ij} = \frac{-\sum_{k=1}^{M} p_{ijk} Ln(p_{ijk})}{H_m} \qquad (0 \leqslant Vg_{ij} \leqslant 1) \tag{8}$$

et la variabilité moyenne intra-groupe pour le $i$ème descripteur sera alors

$$Vw_i = \frac{\sum_{j=1}^{NC} Vg_{ij}}{NC} \qquad (0 \leqslant Vw_i \geqslant 1) \tag{9}$$

ou bien, si une valeur pondérée est souhaitée

$$Vw_i' = \frac{\sum_{j=1}^{NC} N_j \,.\, Vg_{ij}}{NT} \qquad (0 \leqslant Vw_i \leqslant 1) \tag{10}$$

On définit alors le pouvoir classificatoire du *i*ème descripteur PC_i comme

$$PC_i = 1 - Ww_i$$

c'est-à-dire le complément de la variabilité intra-groupe. PC_i sera minimum quand Vw_i sera maximale et vice versa. A titre d'exemple, on a pour la figure 6:

Descripteur 1 $Vg_{11} = Vg_{12} = Vg_{13} = 1{,}0$
$Vw_1 = 1{,}0 \qquad PC_1 = 0$
Descripteur 4 $Vg_{41} = Vg_{42} = Vg_{42} = 0$
$Vw_4 = 0 \qquad PC_4 = 1{,}0$

Ces formules s'appliquent aux descripteurs à deux et à trois états. Pour ceux à trois états, il se présente toutefois une difficulté analogue à celle que nous avons soulevée à propos de la variabilité totale. La figure 6 montre les variations de trois descripteurs à l'intérieur d'un même microfaciès. Les valeurs de *Vw* ainsi que de *PC* sont les mêmes pour les deux premiers descripteurs, bien que la variabilité intra-groupe réelle de D1 soit plus grande que celle de D2 (états plus « éloignés »). Cet exemple est fort heureusement fictif, et une configuration telle que celle de D1 ne se rencontre jamais en pratique (tous les dendrogrammes examinés montrent des groupes du type D2 ou D3).

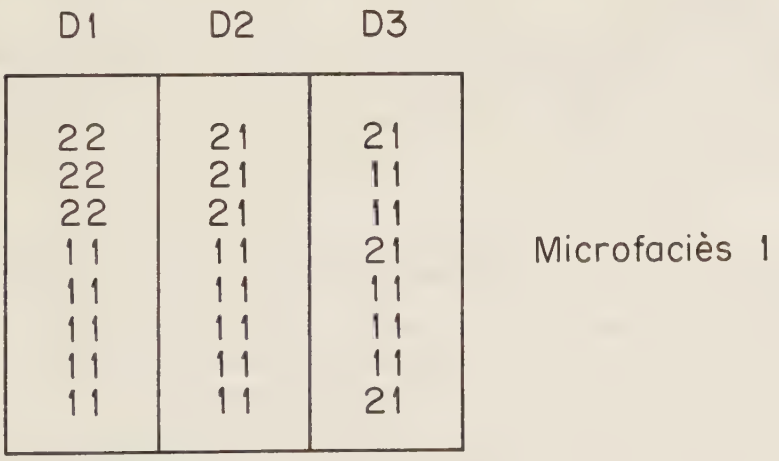


FIG. 6. — Variabilité intra-groupe des descripteurs à 3 états et présence de sous-faciès.

On peut par conséquent admettre que les paramètres *Vw* et *PC* conviennent aux descripteurs binaires et ordinaux.

4.3.2. *Présence de sous-faciès*

Sur la figure 6, on peut constater que la valeur de *PC* est la même pour les descripteurs D2 et D3; or, le premier montre nettement deux sous-groupes provoqués

par le rassemblement des échantillons codés 21 et 11. Si l'on avait défini le microfaciès au niveau de ces sous-groupes, le pouvoir classificatoire aurait été maximum pour D2. A ce propos, il est clair que plus les groupes seront petits et par conséquent nombreux, plus la variabilité intra-groupe aura de chances d'être faible, et le pouvoir classificatoire grand.

Au niveau où nous avons travaillé sur les dendrogrammes (niveau de similitude de 0,7 env.), seuls de rares descripteurs montrent des microfaciès susceptibles d'être subdivisés en sous-groupes. C'est pourquoi nous pensons qu'une telle opération ne produirait pas des valeurs de *Vw* et *PC* très différentes de celles qui sont présentées dans la table 4.

4.3.3. *Résultats*

Les valeurs du pouvoir classificatoire et de la variabilité intra-groupe ont été groupées dans la table 4 avec celles de la variabilité totale pour comparaison. En raisonnant sur le *PC*, on peut voir que ses valeurs sont élevées pour des descripteurs tels que l'organisme théta, les coraux, le charbon, etc.; ce sont donc, vus sous cet angle, des descripteurs intéressants, car leur variabilité intragroupe est faible. Toutefois, un coup d'œil aux valeurs de la variabilité totale pour ces mêmes descripteurs montre qu'elle est aussi très faible — en d'autres termes, que ces descripteurs sont presque invariants, donc peu intéressants!

On peut conclure de ce paradoxe que l'intérêt d'un descripteur ne peut pas être estimé sur la base de *Vt* et *Vw* (ou *PC*) pris séparément, mais qu'il faut tenir compte de ces deux paramètres simultanément.

4.4. Expression de l'intérêt des descripteurs

4.4.1. *Combinaison de Vt et Vw*

Pour qu'un descripteur soit intéressant dans l'optique d'une classification donnée, on a vu qu'il fallait que *Vw soit aussi petite que possible comparée à Vb* (variabilité entre les groupes). Or, comme il n'a pas été possible d'exprimer *Vb* pour nos descripteurs non numériques, force nous est de recourir à la variabilité totale *Vt*. Comme il a été postulé que les chances de contrastes entre les groupes augmentent avec *Vt* (4.2.1.), on peut admettre qu'un descripteur sera plus intéressant si sa *variabilité totale est proche du maximum*. Il est clair que ce raisonnement est très intuitif, et qu'il devrait être étayé par une démonstration plus rigoureuse; nous considérons donc les lignes qui précèdent comme une hypothèse de travail.

Si l'on reporte en abscisses les valeurs de *Vw* et *PC* et en ordonnées celles de *Vt*, on obtient un diagramme sur lequel sont situés les divers descripteurs (fig. 7). En vertu des conditions qui viennent d'être élaborées, les « meilleurs » descripteurs seront ceux pour lesquels *Vw* sera petite et *Vt* grande. La relation entre les deux

paramètres est nettement sympathique (ils croissent en même temps). Toutefois, un certain nombre de descripteurs sont excentriques par rapport à la droite ajustée manuellement: les plus intéressants sont ceux qui sont situés en direction de la zone dite optimale, où *Vt* est grande et *Vw* petite (ou *PC* grand).

4.4.2. *Résultats*

Sur la figure 7, où sont reportées les valeurs pour la classification avec quartz, nous avons donc défini deux zones optimales renfermant les descripteurs les meilleurs dans l'optique de notre classification:

Zone 1 (très bon)	*Zone 2 (bon)*
Carbonate	Quartz
Sparite	Pellets
Micrite	Oolithes superficielles
Bimodalité	Bryozoaires
Oncolithes	Ostracodes à paroi mince
Trocholines	Echinodermes
Pseudotextularielles	Vermicules

Faute de critères statistiques, les limites de ces zones sont forcément arbitraires; elles ont été fixées à $Vt \geqslant 0{,}6$ et $Vw \leqslant 0{,}6$ (ou $PC \geqslant 0{,}4$). Sur neuf descripteurs à trois états évalués dans cette étude, quatre sont représentés dans les zones optimales; la pondération qui les affecte est donc modérée. En d'autres termes, si cette dernière avait été forte, l'influence des descripteurs à trois états aurait été prépondérante sur la structuration en groupes, et la plupart d'entre eux auraient été très « discriminants ».

La moitié des meilleurs descripteurs sont paléontologiques, ce qui montre leur importance dans une classification de ce type. Trop souvent, on a tendance à négliger la grande quantité d'information fournie par les fossiles, dont les définitions opérationnelles sont d'ailleurs bien meilleures que celles de certains allochems.

Quelle est maintenant la raison pour laquelle les descripteurs ci-dessus sont intéressants ? La réponse complète à cette question sera donnée sous 5. Mentionnons simplement que certains descripteurs ont tendance à être empiriquement corrélés, formant ainsi des *associations* qui influencent fortement la classification. C'est le cas pour les oncolithes — trocholines — pseudotextularielles, ainsi que pour les bryozoaires et les vermicules, les ostracodes à test mince et les échinodermes.

On peut enfin tirer un intéressant parallèle entre la discriminance d'un descripteur telle qu'elle a été définie ici, et sa sensibilité aux variations du milieu. En effet, on observe de nombreux descripteurs qui peuvent se trouver dans des types de roches très divers sans paraître être affectés par des environnements sédimentaires différents. D'autres, en revanche, sont beaucoup plus sensibles au milieu; c'est le cas surtout de certains descripteurs paléontologiques, au nombre desquels on compte les formes

mentionnées ci-dessus. Si donc on élimine l'influence de la pondération due au codage, on voit que l'intérêt ou discriminance d'un descripteur dépend à la fois de sa corrélation avec d'autres caractères et de sa sensibilité au milieu.

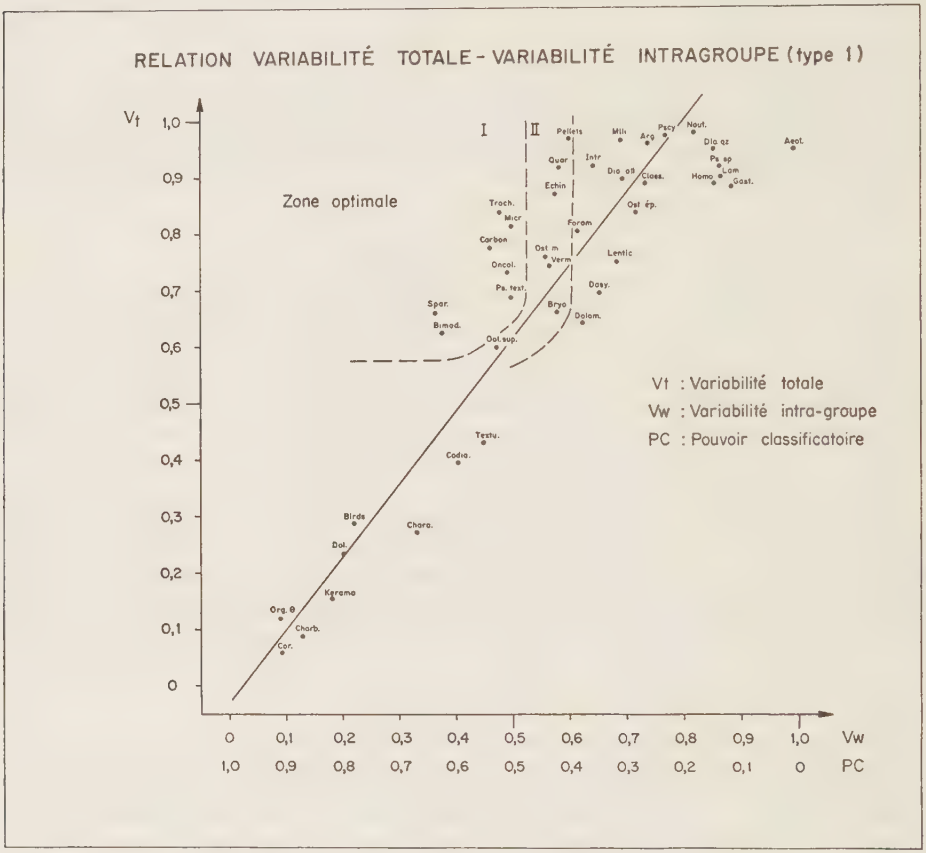


FIG. 7. — Variation de la discriminance des descripteurs en fonction de *Vt* et *Vw*.

5. RELATIONS ENTRE LES DESCRIPTEURS

5.1. INTRODUCTION

L'étude des relations entre les descripteurs tombe dans le domaine de l'analyse dite en mode *R*. Dans le cas habituel de descripteurs numériques, on calcule un coefficient de corrélation pour chaque paire d'entre eux, et la matrice ainsi obtenue est exprimée par un dendrogramme, ou encore sert de base à une analyse de composantes principales (BOYCE, ibid., p. 9) ou de facteurs (KULBICKI et SOURISSE 1968, p. 197).

De telles analyses sont malaisées à faire sur des descripteurs binaires ou ordinaux, et BONHAM-CARTER (1967 *b*, p. 2) en reconnaît déjà la difficulté, laquelle provient avant tout des coefficients de similitude entre descripteurs, principalement lorsque ces derniers sont de nature diverse (« mixed mode »). Nous avons, pour le moment, renoncé à l'emploi des coefficients de similitude pour établir les relations entre nos descripteurs. La méthode simplifiée que nous avons mise au point comprend le test de l'indépendance entre paires de variables, puis le calcul de la force et du signe de l'association entre les variables, et enfin la détermination de leur taux d'association. Ce dernier paramètre permet la mise en évidence de groupes de descripteurs fortement associés.

5.2. DÉTERMINATION DE L'ASSOCIATION

La méthode classique pour déterminer s'il y a indépendance (non-association) entre deux variables non numériques codées respectivement en *NC* et *NL* états est celle du χ^2 calculé à partir d'une table de contingence (*tdc*) de dimension $NC \times NL$. L'hypothèse testée H_0 est qu'il y a indépendance; cette dernière s'exprime par une *tdc* dont les fréquences théoriques φ_{ij} valent

$$\varphi_{ij} = \frac{TL_i \cdot TC_j}{GT} \tag{11}$$

Un exemple de *tdc* est la suivante où le χ^2 est exprimé par (12):

	11	21	22	
2	$f_{11}(\varphi_{11})$	$f_{12}(\varphi_{12})$	$f_{13}(\varphi_{13})$	TL_1
1	$f_{21}(\varphi_{21})$	$f_{22}(\varphi_{22})$	$f_{23}(\varphi_{23})$	TL_2
	TC_1	TC_2	TC_3	GT

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{NL}\sum_{j=1}^{NC}\left(\frac{\varphi_{ij} - f_{ij}}{\varphi_{ij}}\right)^2 \qquad dl = (NC-1)\cdot(NL-1) \tag{12}$$

L'hypothèse est rejetée si le χ^2 calculé à partir de (12) est plus grand que le χ^2 fourni par une table pour le nombre de degrés de liberté *dl* et une probabilité donnée; cette dernière est généralement égale à 0,05, et représente la probabilité pour que sous l'hypothèse H_0 d'indépendance, le χ^2 calculé dépasse celui de la table. Rejeter l'hypothèse H_0 revient à admettre une *association* entre les variables.

Il est également possible de déterminer si l'association est positive ou négative. FREEMAN et HALTON (1950) donnent la formule suivante (notation modifiée[1]) valable pour une *tdc* où les états sont placés comme ci-dessus:

[1] P. VUAGNAT nous a signalé une erreur dans la formule citée par ces auteurs à la page 145: N^2 doit être remplacé par N.

$$\text{Si} \qquad (f_{13} + f_{21}) - (f_{11} + f_{23}) > \frac{(TC_3 - TC_1)(TL_1 - TL_2)}{GT} \qquad (13)$$

le signe de l'association est *positif*.

Déterminer s'il y a association entre les descripteurs, ainsi que le signe de cette dernière, est déjà un résultat appréciable. Les calculs ont été faits par le programme ARMOD et les résultats sont exprimés graphiquement sur la planche II. Cette dernière indique en outre la force approximative de l'association: Forte si le χ^2 calculé $\geqslant 4$ fois le χ^2 de la table [1], faible autrement. La signification géologique de cette table sera examinée sous 5.4.

5.3. Matrice des interactions et taux d'association

A défaut d'un dendrogramme, la matrice de la planche II présente l'essentiel des relations entre les descripteurs. En examinant cette matrice ligne par ligne, on peut compter le nombre de fois où un descripteur donné est fortement associé positivement (a^+) et négativement (a^-) à tous les $ND - 1$ autres descripteurs. On définit alors le taux d'association total A

$$A = \frac{a^+ + a^-}{ND - 1} \qquad (0 \leqslant A \leqslant 1) \qquad (14)$$

ce taux étant lui-même la somme de

$$A^+ = \frac{a^+}{ND - 1} \qquad \text{et} \qquad A^- = \frac{a^-}{ND - 1} \qquad (15)$$

qui en sont les composants respectivement positif et négatif. Les valeurs des paramètres A, A^+ et A^- sont reportées sur la table 5. On voit que A varie de zéro pour des descripteurs comme les characées et l'organisme théta, qui ne sont fortement associés à aucun autre descripteur, à 0,49 pour le quartz et les trocholines, liés à de nombreux autres descripteurs.

Quelle est la signification de A? Si un descripteur n'est associé, positivement ou négativement, qu'à peu d'autres, il peut s'agir:

— d'un descripteur à *mauvaise définition opérationnelle* dont l'évaluation n'a pas été faite de manière reproductible; ce pourrait être le cas de la pseudo-sparite ($A = 0{,}16$) et de l'homogénéité ($A = 0{,}16$).

— d'un descripteur presque *invariant*; c'est le cas de l'organisme théta, des characées, oolithes et « birdseyes ».

— d'un descripteur *réellement indépendant*; ce dernier cas pourrait inclure la taille du quartz, Aeolysaccus, les gastéropodes et lamellibranches.

---

[1] Il aurait été préférable de définir l'association forte par $\chi^2 \geqslant \chi^2_{prob}$, où prob serait égal à 0,001 par exemple (P. Vuagnat, comm. orale).

TABLE 5

Taux d'association A pour tous les descripteurs

Descripteur	Nombre d'associations		Total	Taux d'assoc. total A	Taux d'association		Rang de A
	a nég.	a pos.			A^+	A^-	
Carbonate	6	8	14	0,38	0,16	0,22	9
Quartz	11	7	18	0,49	0,30	0,19	1
Argile	8	4	12	0,32	0,21	0,11	10
Dolomite	1	3	4	0,11	0,03	0,08	29
Oolithes sup.	0	3	3	0,08	0	0,08	32
Oolithes	0	2	2	0,05	0	0,05	34
Pellets	9	6	15	0,41	0,25	0,16	7
Intraclastes	6	9	15	0,41	0,17	0,24	8
Sparite	4	7	11	0,30	0,12	0,18	12
Pseudosparite	2	4	6	0,16	0,05	0,11	23
Micrite	7	3	10	0,27	0,19	0,08	14
« Birdseyes »	1	1	2	0,05	0,02	0,03	35
Taille alloch.	4	12	16	0,43	0,11	0,32	5
Taille quartz	1	2	3	0,08	0,03	0,05	33
Classement	8	4	12	0,32	0,21	0,11	11
Bimodalité	1	4	5	0,14	0,03	0,11	26
Homogénéité	4	2	6	0,16	0,11	0,05	24
Bryozoaires	3	7	10	0,27	0,08	0,19	15
Dasycladacées	1	3	4	0,11	0,03	0,08	30
Codiacées	0	2	2	0,05	0	0,05	36
Oncolithes	6	11	17	0,46	0,16	0,30	3
Characées	0	0	0	0	0	0	37
Ostrac. minces	8	3	11	0,30	0,22	0,08	13
Ostrac. épais	4	2	6	0,16	0,11	0,05	25
Milioles	6	11	17	0,46	0,16	0,30	4
Trocholines	6	12	18	0,49	0,17	0,32	2
Nautilocul.	1	9	10	0,27	0,03	0,24	16
Lenticulines	1	4	5	0,14	0,03	0,11	27
Pseudotextul.	2	6	8	0,22	0,06	0,16	20
Pseudocycla.	2	8	10	0,27	0,05	0,22	17
Textulaires	1	3	4	0,11	0,03	0,08	31
Forams. div.	3	7	10	0,27	0,08	0,19	18
Lamellibr.	4	4	8	0,22	0,11	0,11	21
Gastéropodes	5	5	10	0,27	0,13	0,14	19
Echinoder.	8	8	16	0,43	0,21	0,22	6
Aeolysaccus	0	5	5	0,14	0	0,14	28
Organisme θ	0	0	0	0	0	0	38
Vermicules	2	5	7	0,19	0,05	0,14	22

Si un descripteur est associé à beaucoup d'autres, cela signifie que des causes communes ont agi sur eux. Ces dernières peuvent se trouver à l'intérieur de l'ensemble des descripteurs, ou à l'extérieur.

Nous avons aussi examiné quelles sont les relations entre le taux d'association total A et les paramètres Vt (variabilité totale) et Vw (variabilité intra-groupe) ou PC (pouvoir classificatoire) définis précédemment:

— Relation $Vt - A$: pour une Vt petite, A est aussi petit et la corrélation est assez bonne; mais dès que les deux paramètres augmentent, la dispersion devient très forte et la relation très lâche. On peut donc en conclure que pour les descripteurs suffisamment variables, il n'y a pas de relation entre la variabilité totale et le taux d'association total.

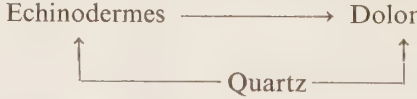
— Relation $PC - A$: on pourrait s'attendre à une augmentation du pouvoir classificatoire en fonction de A, les variables inter-corrélées pesant plus lourd dans la formation des microfaciès. Il existe en effet une telle relation, mais assez dispersée, probablement par l'effet perturbateur de la variabilité totale.

5.4. Résultats obtenus

Nous allons examiner séparément les descripteurs non paléontologiques et paléontologiques, ces derniers dans le but de mettre en évidence quelques associations faunistiques.

5.4.1. *Descripteurs non paléontologiques*

— Quartz ($A = 0{,}49$): c'est un constituant relativement abondant, en volume, dans de nombreux échantillons. Sa présence va donc antipathiquement influencer l'un des autres constituants abondants comme le carbonate. En tant que terrigène, il est associé positivement aux argiles; quant à la relation avec le diamètre du quartz, elle est logique. Enfin, un bel exemple de relation indirecte est donné par la trilogie quartz-dolomite-échinodermes. On a vu précédemment que la dolomite provenait du test des échinodermes; d'autre part, son expression cristallographique sous forme de rhomboèdres idiomorphes provient certainement de la porosité produite par l'arrangement des grains de quartz. Il existe donc une relation causale



— Pellets (0,41): ces corpuscules d'origine énigmatique sont fortement associés au quartz, à la pseudosparite, au classement et aux échinodermes, entre autres. Ils dépendent donc du *facteur* sous-jacent contrôlant le détritisme terrigène et échinodermique.

— Intraclastes (0,41): hormis dans des cas assez rares et intermédiaires, il semble y avoir incompatibilité entre les intraclastes et l'association quartz-pellets-échinodermes. En revanche, la nature carbonatée des intraclastes les associe à la calcite, et leur taille généralement grande influence le descripteur « taille des allo-

chems ». Leur association avec les fins débris de bryozoaires, les vermicules (Thurammines) et les lamellibranches définit pratiquement le microfaciès intramicrite; nous ignorons la raison de cette association.

— Classement (0,32): ce paramètre touchant aux allochems est lié positivement à la fois aux oolithes et aux pellets, ainsi qu'à l'homogénéité. Le classement peut donc être bon dans deux microfaciès très différents, mais tous deux « dynamiques », qui sont les intrasparites oolithiques et les échinopelletites.

— Sparite (0,30): elle est bien naturellement liée positivement au carbonate et négativement aux terrigènes et à la micrite. Elle a aussi une relation positive avec les oolithes, les oncolithes, milioles, trocholines et textulaires; ces derniers sont roulés et montrent souvent un début d'oolithisation. Cette association caractérise un milieu de haute énergie.

5.4.2. *Descripteurs paléontologiques*

On a recalculé les taux A, A^+ et A^- en ne tenant compte que des 21 descripteurs paléontologiques, afin de mettre en évidence leurs associations éventuelles (au sens écologique du mot). Les résultats ont été reportés sur les tables 6 et 7.

TABLE 6

Taux d'association A' pour les descripteurs paléontologiques

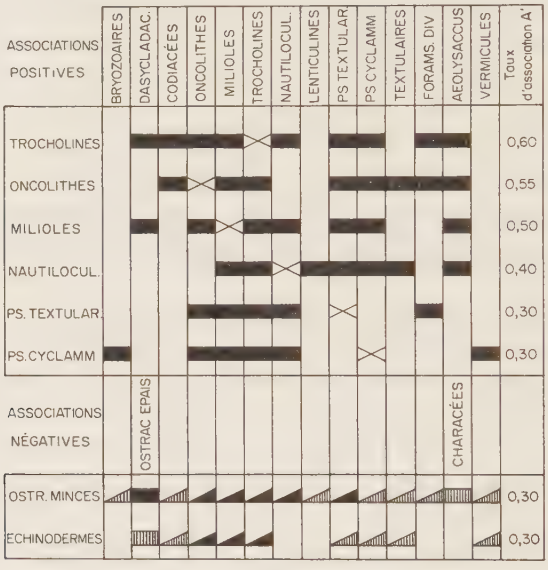
Descripteur	Nombre d'associations		Total	Taux d'assoc. total A'	Taux d'association		Rang de A'
	a' nég.	a' pos.			A'^-	A'^+	
Bryozoaires	0	4	4	0,20	0	*0,20*	11
Dasycladacées	1	3	4	0,20	0,05	*0,15*	12
Codiacées	0	2	2	0,10	0	0,10	17
Oncolithes	3	8	11	0,55	0,15	*0,40*	2
Characées	0	0	0	—	—	—	20
Ostrac. minces	5	1	6	0,30	*0,25*	0,05	5
Ostrac. épais	3	1	4	0,20	*0,15*	0,05	13
Milioles	3	7	10	0,50	0,15	*0,35*	3
Trocholines	3	9	12	0,60	0,15	*0,45*	1
Nautiloculines	1	7	8	0,40	0,05	*0,35*	4
Lenticulines	0	2	2	0,10	0	0,10	18
Pseudotextular.	1	5	6	0,30	0,05	*0,25*	6
Pseudocyclamm.	0	6	6	0,30	0	*0,30*	7
Textulaires	0	2	2	0,10	0	0,10	19
Forams. divers	1	4	5	0,25	0,05	*0,20*	9
Lamellibran.	2	2	4	0,20	0,10	0,10	14
Gastéropodes	1	3	4	0,20	0,05	*0,15*	15
Echinodermes	6	0	6	0,30	*0,30*	0	8
Aeolysaccus	0	5	5	0,25	0,0	*0,25*	10
Organisme θ	0	0	0	—	—	—	21
Vermicules	0	3	3	0,15	0	0,15	16

— Descripteurs « sociaux » et « asociaux »

Si l'on sépare les composants dans l'indice A', deux cas principaux peuvent se présenter: soit, ce sont les associations positives qui dominent, soit les négatives. Dans le premier cas, cela signifie que le descripteur a tendance à être associé à plusieurs autres: l'organisme considéré est « social ». Dans le second cas, il se trouve en général seul, excluant pratiquement la présence d'autres organismes: il est « asocial ».

TABLE 7

Associations fortes parmi les descripteurs paléontologiques



NB : Pour les ostracodes minces et les échinodermes, les associations faibles (hachuré) sont mentionnées pour mémoire.

— Associations fortes ($A' \geqslant 0{,}30$)

Les 8 formes ayant un $A' \geqslant 0{,}30$ (seuil arbitraire) présentant un taux d'association suffisamment fort pour qu'on puisse en tirer des conclusions valables. Ajoutons que les associations faibles (comprises entre le seuil de signification et $4\chi^2$ de la table) devraient aussi être utilisées dans tous les raisonnements de ce paragraphe afin de les nuancer quelque peu.

Trois groupements ressortent de l'examen des tables 6 et 7:

1) Groupement algues + milioles + trocholines + nautiloculines + pseudotextularielles + Aeolysaccus + pseudocyclammines + forams divers ± textulaires ± lenticulines ± bryozoaires. Les trois derniers ne sont liés qu'à quelques-uns des premiers; ils sont « au bord » du groupement, formé de descripteurs *sociaux*.

2) Groupement ostracodes à test mince + ostracodes à test épais ± characées, ces dernières étant faiblement associées aux précédents. Les ostracodes sont pratiquement les seuls membres de cette association, ils sont donc *asociaux*.

3) Groupement échinodermes + ostracodes à test épais. Il est constitué d'organismes *asociaux*, les échinodermes, qui excluent pratiquement tout autre faune ou flore.

Ces trois groupements ou associations semblent être caractéristiques de biotopes différents qui sont respectivement:

1) Biotope à salinité normale, riche en faune et flore, situé près et en arrière du récif. La présence de ce dernier a été mise en évidence par STEINHAUSER (1969).

2) Biotope micritique à faune pauvre, montrant des influences saumâtres.

3) Biotope échinodermique à faune abondante en individus, mais très restreinte en variété. Dans ce dernier cas, le terme biotope est peut-être mal choisi, les encrines ayant été vraisemblablement transportées et les éléments autochtones étant très rares dans le microfaciès échinopelletite.

Il est donc intéressant de constater que ces biotopes correspondent respectivement aux microfaciès intrabiopelmicrite, micrite et échinopelletite, alors que les intramicrites ne sont caractérisées par aucune association de faune bien significative; cela est certainement dû à la pauvreté de cette dernière.

6. CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Les méthodes et résultats présentés dans cet article doivent être maintenant évalués et critiqués.

En ce qui concerne les descripteurs, ils devraient tous être exprimés en pourcentages, car c'est l'échelle qui fournit le maximum d'information. Si des échelles plus simples ont été choisies, c'est pour des raisons de rapidité de mesure, permettant ainsi l'étude d'un nombre maximum de descripteurs.

La méthode de classification des échantillons part de la matrice des coefficients de coïncidence de Sokal-Michener; ce coefficient a été choisi de préférence à celui de Jaccard, car il tient compte des coïncidences négatives (voir 3.1.1.). Ceci est nécessaire, car pour plusieurs descripteurs, le code « 1 » ne signifie pas « absent », mais « rare » ou « petit ».

La mise en évidence des groupes s'est faite par une méthode hiérarchique produisant un dendrogramme. L'espoir d'obtenir des faciès et sous-faciès hiérarchiquement liés d'une façon claire ne s'est que partiellement réalisé, les branchements inférieurs du dendrogramme n'étant que peu contrastés. Il serait intéressant de soumettre les mêmes données à l'analyse typologique et de comparer les résultats des deux méthodes.

Les sept microfaciès mis en évidence dans la Formation de Vions peuvent être considérés comme des groupements naturels dépendant de nombreux descripteurs, et non pas seulement de caractères pétrographiques ou chimiques. Ils ont donc plus de chances de refléter les différents paléo-environnements qui se sont succédé dans la Formation de Vions. En outre, la méthode des profils (voir fig. 3), empruntée à la psychologie, permet de caractériser visuellement et d'une façon standard les divers microfaciès.

L'importance des descripteurs pour la classification (discriminance) a ensuite été étudiée par le biais des variabilités totale et intra-groupe. Le recours à ces paramètres basés sur la notion d'entropie a été rendu nécessaire par la nature non numérique des descripteurs. La méthode présentée est certainement imparfaite, mais elle a donné des résultats tout à fait cohérents: la discriminance d'un descripteur dépend à la fois de son inter-corrélation avec d'autres et de sa sensibilité au milieu.

Finalement, les relations entre les descripteurs ont été abordées sans passer par les coefficients de corrélation ou de contingence, dont l'emploi était rendu délicat par la diversité des échelles de mesure. Si ces dernières avaient été uniformes, des coefficients de similitude auraient pu être calculés et une analyse de facteurs menée à bien. A défaut, la distinction d'associations fortes entre les descripteurs a permis le calcul du taux d'association mesurant leur degré d'indépendance. Dans le domaine paléontologique en particulier, on a défini ainsi des descripteurs « sociaux », qui tendent à former des associations naturelles, et des descripteurs « asociaux », qui se trouvent en général seuls. Trois principales associations ont été mises en évidence: la première comprend des foraminifères et des algues, la seconde des ostracodes à test mince et des characées et la troisième des échinodermes et des ostracodes à test épais.

En conclusions, nous pensons qu'en dépit de certains points faibles, la démarche présentée dans cet article permet d'aborder d'une façon intégrée la classification d'un ensemble d'échantillons sédimentaires: elle permet d'une part la définition aussi objective que possible de microfaciès basés sur de nombreux caractères, et d'autre part favorise l'étude critique de ces mêmes caractères, ainsi que la mise en lumière des relations qui les lient.

BIBLIOGRAPHIE

Abréviations :

IAMG journ. = Journal of the International Association for Mathematical Geology.
Arch. Sc. = Archives des Sciences physiques et naturelles, Genève.
Eclog. = Eclogae geologicae helvetiae.
Kansas CC = Kansas State Geological Survey Computer Contribution.

Ager, D. (1963). Principles of paleoecology. McGraw Hill, London.

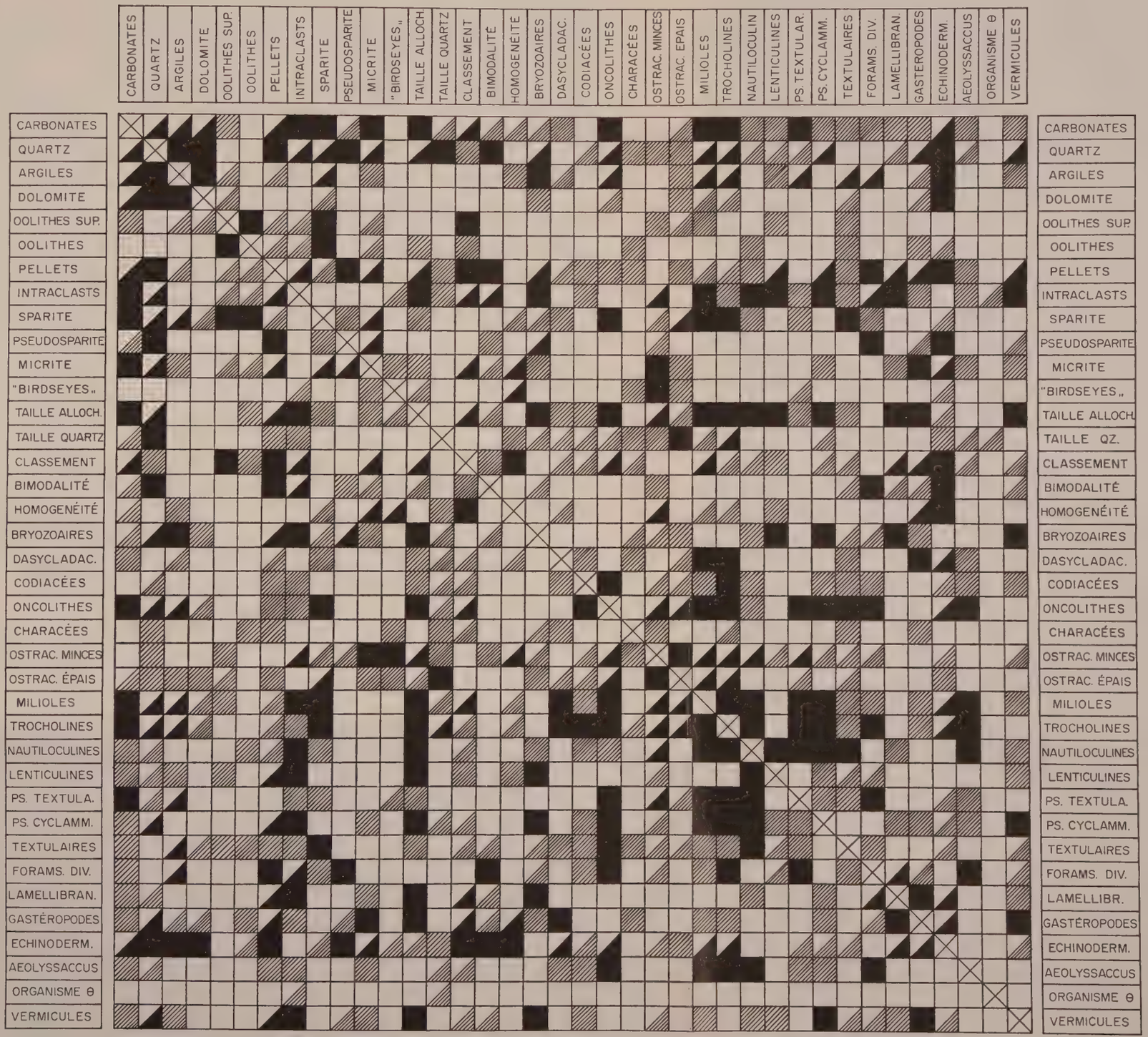
Bergonier, H. et B. Morin (1972). Hasard et typologie. Preprint du Séminaire Segmentation et Typologie, Bruxelles, 11-13 mai 1972

DENDROGRAMME NUMERO 1
CLASSIFICATION DE 178 ECHT. AU HASARD - 7 CPES - D1 - SU
COEFFICIENT DE COINCIDENCE DE SOKAL-MICHENER
METHODE PAIRE-GROUPE NON PONDEREE
COEFFICIENT DE SIMILITUDE
1,0 0,9 0,8 0,7 0,6 0,5 0,4 0,3 0,2 0,1 0,0
INTRABIOPELMICRITE
INTRASPARITE
INTRAMICRITE
ECHINOPELLETITE
MICRITE
PELMICRITE
DIVERS

TABLEAU EXPRIMANT LA RELATION ENTRE LES DESCRIPTEURS

basé sur les valeurs du χ^2 calculé dans les tables de contingence (programme ARMOD)

- Forte relation positive (χ^2calc. $\geqslant 4\,\chi^2$ table)
- Faible relation positive ($\chi^2 < 4\,\chi^2$ table)
- Relation non significative
- Forte relation négative
- Faible relation négative



BOLLIGER, W. (1968). Sedimentologische und stratigraphische Untersuchungen an Plattform- und Bechensedimenten des Oxfordien im Solothurner und östlichen Berner Jura. Thèse Univ. de Bâle.

BONHAM-CARTER, G. (1967 *a*). An example of the analysis of semi-quantitative petrographic data. *7th World Petr. Congr. Proceed.*, 2, p. 566.

—— (1967 *b*). Fortran IV program for Q-mode cluster analysis of non-quantitative data using IBM 7098/7094 computers. *Kansas CC 17.*

BOYCE, A. (1969). Mapping diversity: a comparative study of some numerical methods. In *Numerical Taxonomy*, a symposium ed. by A. J. Cole, Academic Press, London.

CHILINGAR, G. et al. (1967). Carbonate Rocks, in Developments in sedimentology, *Elsevier*. 2 vol.

CORNUAU, C. et M. FREYSSENET (1968). L'analyse typologique d'une aire métropolitaine. Minist. de l'équipement et du logem., Serv. Techn. central d'aménag. et d'urbanisme, Paris.

DEMIRMEN, F. (1969). Multivariate procedures and Fortran-IV program for evaluation and improvement of classifications. *Kansas CC 31.*

FOLK, R. (1962). Spectral subdivision of limestone types. Memoir 1, *AAPG.*

FREEMAN, G. et J. HALTON (1950). Note on an exact treatment of contingency, goodness-of-fit and other problems of significance. *Biometrika*, 38, p. 141.

JAQUET, J.-M. (1966). Etude géologique de la région du Reculet, Ain, France. Diplôme Institut de géol., Univ. de Genève.

—— (1972). Application de méthodes statistiques à l'étude d'une formation calcaire du Berriasien supérieur, Jura méridional. Thèse, Département de Géologie, Université de Genève.

KRUMBEIN, W. et F. GRAYBILL (1965). An introduction to statistical models in geology. McGraw Hill Co., London.

KULBICKI, G. et C. SOURISSE (1968). Aspect actuel du traitement sur ordinateur des données géochimiques au CRP; *Bull. Centre. SNPA Pau*, 2/1.

MCCAMMON, R. et G. WENNINGER (1970). The dendrograph. *Kansas CC* 48.

MILLER, R. et J. KAHN (1962). Statistical analysis in the geological sciences. Wiley & Sons, New-York.

PARKS, J. (1970). Fortran-IV program for Q-mode cluster analysis on distance function with printed dendrogram. *Kansas CC* 46.

PELTO, C. (1954). Mapping of multicomponent systems. *Journ. of Geol., 62/5.*

SIEGEL, S. (1956). Nonparametric statistics for the behavioral sciences. McGraw Hill, New-York.

SOKAL, R. et P. SNEATH (1963). Principles of numerical taxonomy. W. Freeman & Co., London.

STEINHAUSER, N. (1969). Recherches stratigraphiques dans le Crétacé inférieur de la Savoie occidentale. Thèse, Institut de géol., Univ. de Genève.

WERNLI, R. et J.-M. JAQUET (1972). Le Bathonien et le Callovien du Col du Sac (Grand-Crédo, Jura méridional); *CR séances SPHN Genève.* 7/1.

WISHART, D. (1969). Fortran-II programs for 8 methods of cluster analysis (CLUSTAN I). *Kansas CC* 38.

LEGENDES DES PLANCHES

PLANCHE I. — Dendrogramme de la classification type 1 (avec quartz)

PLANCHE II. — Type de relations entre les descripteurs non numériques